干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

油莎豆(*Cyperus esculentus*)耕作区作物残茬对农田风蚀的影响

谭 锦[1,2], 吴秀芹[1,2], 阮永健[1,2], 张 欢[1,2], 冯梦馨[1,2], 莎日娜[1,2]

(1. 北京林业大学水土保持学院,北京 100083;
2. 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站,宁夏 盐池 751500)

摘 要: 油莎豆(*Cyperus esculentus*)是一种油料作物,其对土壤养分要求低,因此适合在我国北方风沙区推广种植,以调整农业种植结构。然而在采收过程中对土地的扰动,会潜在增加农田风蚀的风险,因此需要对油莎豆残茬的生态效益进行探究与评估。基于野外集沙实验和风速廓线测定实验,对油莎豆与梭梭间作未采收、油莎豆纯作留4垄采6垄和油莎豆纯作留6垄采6垄3种残茬类型的防风固沙能力进行了系统研究。结果表明:油莎豆与梭梭间作残茬类型中的输沙通量最低,总输沙通量显著小于其他2种模式($P<0.05$),并且空气动力学粗糙度(0.553 cm和1.156 cm)和摩阻速度(0.304和0.332)也最高。留4垄采6垄模式输沙通量随时间增加,甚至超过全采收模式,空气动力学粗糙度接近于0,且摩阻速度最低。留6垄采6垄模式输沙通量则介于前两者之间,空气动力学粗糙度为0.100 cm和0.137 cm,摩阻速度为0.240和0.272。总体而言,单一的宽条带式油莎豆残茬削减风速的作用不如高低穿插搭配的作物残茬。油莎豆种植可以考虑选择合适的采收间距及搭配合适的直立植物进行间作,以在油莎豆采收后漫长的休耕期进行留茬以减轻风蚀保护农田。休耕期合理的作物留茬是减轻土壤风蚀的关键措施之一,这对于干旱区农田的可持续发展具有重要的生态价值。

关 键 词: 油莎豆; 作物残茬; 输沙通量; 风沙流; 空气动力学粗糙度; 摩阻速度
文章编号:

土壤风蚀是我国干旱与半干旱地区风沙区农田生产力下降的主要影响因素,每年多达9.1×10^7 hm^2的农田因此而弃耕[1]。土壤风蚀不仅会导致土壤结构破坏,使土壤质地粗化,还导致土壤肥力下降,可持续生产力降低[2-3]。因此,许多学者对如何抑制农田风蚀,以保护农田生产力进行了深入研究。这些研究表明,残茬覆盖、留茬、免耕等保护性耕作措施能够有效降低风速,截留沙粒,消耗风能,提高土壤抗蚀性,保护农田土壤[4-6]。Gao等[7]对内蒙古奈曼旗的农田风蚀监测发现,留茬保护性耕作农田的土壤风蚀量显著低于传统耕作农田;杨彩红等[8]对比了保护性耕作和传统耕作2种模式下的输沙量,发现保护性耕作的风蚀量明显低于传统耕作;Pi等[9]以美国西北地区的土壤和常见作物为研究对象进行风洞实验,发现作物残茬覆盖对土壤表面提供了不同程度的保护,减轻了风蚀。可见,在风沙区农田进行耕作时,可以采用多种耕作措施和留茬覆盖措施,以达到减轻土壤风蚀目的。

内蒙古自治区地处我国干旱与半干旱区,囊括了八大沙漠中的4个及其全部沙地。干燥、少雨、风沙活动强烈的恶劣环境,严重影响着农业的生产发展[10]。习近平主席在内蒙古考察时指出,对于内蒙古生态和农业发展,要探索出一条符合战略定位、体现内蒙古特色,以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展新路子[11]。在全球气候变化及经济快速发展的背景下,农业种植结构急需探索一条新路

收稿日期: 2021-07-09; **修订日期**: 2021-09-28
基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0507600,2019YFC0507601)资助
作者简介: 谭锦(1993-),男,博士研究生,主要从事荒漠化防治和植物生态学研究. E-mail: 614831698@qq.com
通讯作者: 吴秀芹(1974-),女,教授,博士,主要从事荒漠化防治和自然地理研究. E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

子以适应复杂多变的气候。内蒙古种植的主要传统作物，包括小麦(*Triticum sativum*)、玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、大豆(*Glycine max*)及向日葵(*Helianthus annuus*)等，已不能完全满足科技化、生态化的种植结构[12-14]。被农业部认定为无公害有机农产品的油莎豆(*Cyperus esculentus*)(公告2012年第2号)，不但具有耐旱、耐瘠薄、耐盐碱等特性，还可以从中提取优质的植物油[15]。所以，油莎豆适合在沙区进行种植，并且能够起到减轻土地压力，改善环境作用，具有巨大的开发潜能，其也因此被科技部纳入《全国种植业结构调整规划(2016—2020年)》[16-17]。2019年内蒙古自治区与科技部启动实施了“科技兴蒙”行动，现代农业和生态环境建设是行动中非常重要的一环，油莎豆的推广种植及其经济价值、生态价值的研究则是实现生态产业化和产业生态化的重要举措[18]。

油莎豆的主要经济来源是其地下块茎，若以获取经济收益为主进行种植，采收时势必会对农田进行扰动，致使农田的土壤裸露，风蚀危害大大增加。而若以防治风蚀为主，过多的留茬必然会浪费油莎豆丰富的油脂资源。目前已有学者提出一些油莎豆的种植和采收方式来增强其防风固沙效益，包括带状间隔留茬、间轮作和立体种植等[19]，但是这些模式的防风固沙效益到底能达到何种程度还不是非常明确。本研究以内蒙古磴口县乌兰布和农场种植的油莎豆为研究对象，旨在明确油莎豆不同留茬模式对农田风蚀的影响，为该地油莎豆种植区的土壤风蚀防治工作提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于乌兰布和农场油莎豆种植示范区，归属于内蒙古巴彦淖尔市磴口县，地理坐标介于106°33′28″~106°34′19″E，40°27′32″~40°27′44″N之间(图1)。该地气候为温带大陆性气候，降雨稀少，昼夜温差大，但光热源丰富，无霜期长。年平均降水量仅有139.2 mm，且主要集中在7—8月，年平均蒸发2387.6 mm，年平均气温7.5 ℃，最高气温35.5 ℃，最低气温-23.7 ℃，全年日照时数3263 h，6月甚至能够达到319.3 h，无霜期可达130 d[20-21]。自然植被以灌木为主，包括白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、梭梭(*Haloxy-*

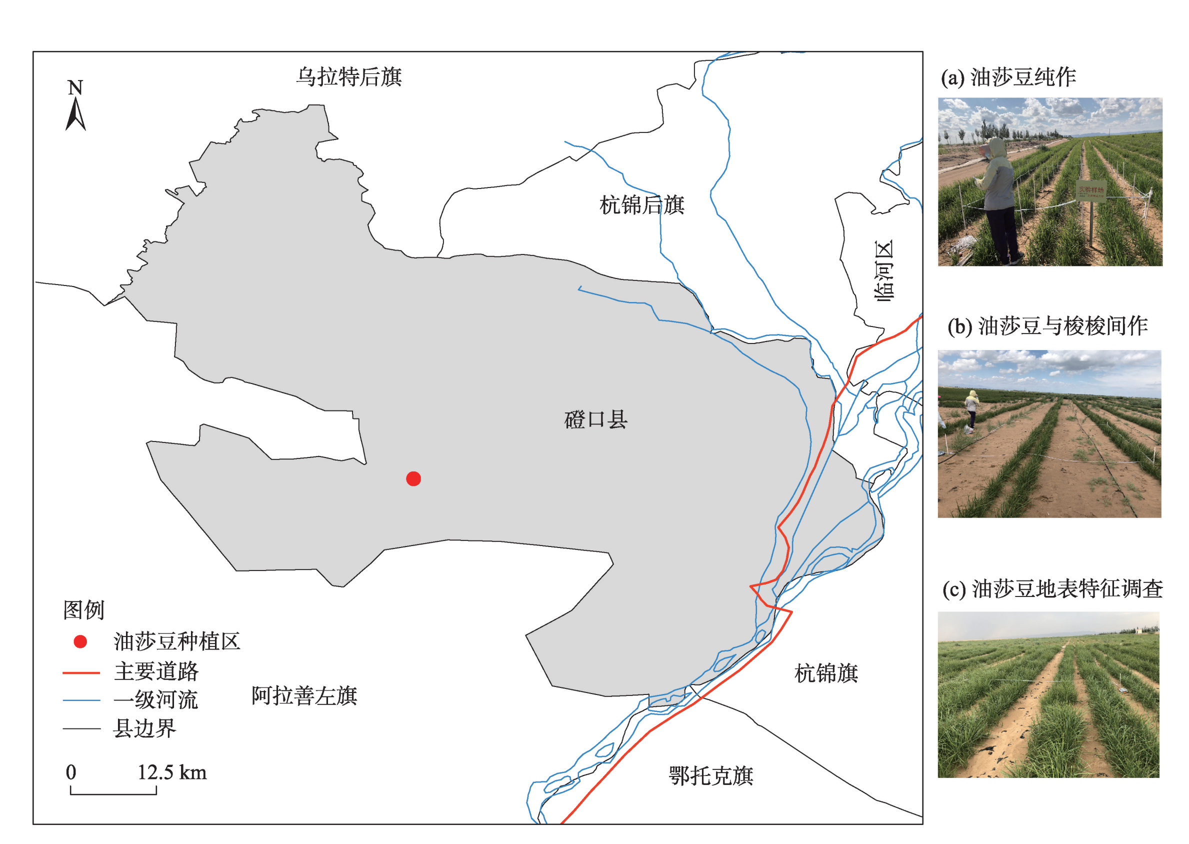


图1　油莎豆种植示范区

Fig. 1　Demonstration area of *Cyperus esculentus* planting

lon ammodendron)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等,还包括沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、芦苇(*Phragmites australis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等草本。土壤以风沙土为主,局部地区还分布灰漠土、灌淤土[22]。

2 材料与方法

2.1 作物残茬类型

油莎豆种植示范区以条播种植方法为主,每垄2排油莎豆,平均宽度约为0.7 m。由于不同地表特征的残茬防风固沙能力不同[23],加之使用的自走式油莎豆收割一体机(专利号:CN201811584002.4)以3垄为单位进行采收,结合示范区实际情况,示范区作物残茬类型主要分为以下3种(图2b~d):油莎豆纯作留4垄采收6垄(留4采6);油莎豆纯作留6垄采收6垄(留6采6);及油莎豆与梭梭的间作未采收(1垄油莎豆搭配1排梭梭进行间作,油莎豆和梭梭均不采收),调查时梭梭已枯萎且周围长满了以沙蓬为主的自然植被。前2种残茬类型的油莎豆为东—西走向,间作未采收的油莎豆为南—北走向。同时,对全采收的裸耕地进行风蚀监测以作对照(图2a)。不同留茬地表特征参数见表1,土壤基本理化性质见表2。

2.2 输沙通量及风沙流结构特征

在全采收地块和不同残茬类型的地块中布设集沙仪进行输沙通量的测定。集沙仪类型为组合式多通道集沙仪,共16个梯度,分别为0~3 cm、3~6 cm、6~9 cm、…、39~42 cm、42~45 cm、45~48 cm,各通道进口宽1.5 cm,高3.0 cm,通道长度为20.0 cm(图2e)。为能够充分利用7个集沙仪,并且使3种残茬类型中的集沙仪在大致相同的距离(以迎风距离最短的间作来参照确定)内能够同时集沙,将1个集沙仪布设在全采收地块作为参照,另外6个布设在3种不同残茬类型的地表,每种类型布设2个集

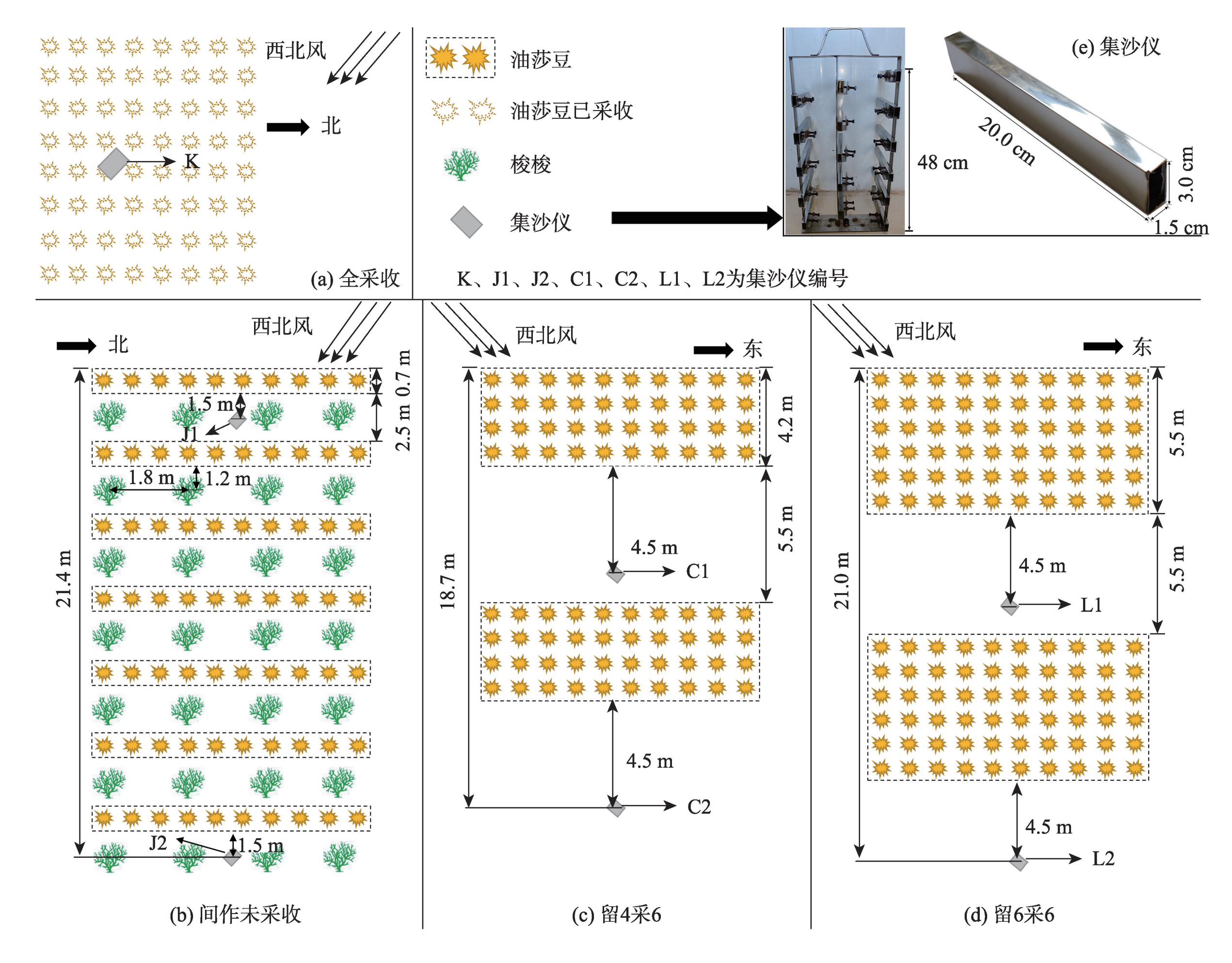


图2 残茬类型示意图及集沙仪布设

Fig. 2 Schematic diagram of residue types and layout of sand collectors

表1　不同残茬类型地表特征参数

Tab. 1　Characteristic parameters of different residue types

残茬类型	调查时间(年-月-日)	平均高度/cm	盖度/%	平均带宽/m	平均带间距/m
间作留茬(油莎豆)	2020-10-10	37.5	14.01	0.7	2.5
	2020-11-15	25.1	13.72		
	2020-12-26	21.8	13.29		
	2021-03-03	16.7	9.88		
间作留茬(梭梭)	2020-10-10	112.1	0.32	0.4	3.1
	2020-11-15	110.5	0.30		
	2020-12-26	106.3	0.29		
	2021-03-03	105.8	0.25		
留4采6	2020-10-10	38.5	10.27	4.2	5.5
	2020-11-15	19.6	9.81		
	2020-12-26	15.4	3.02		
	2021-03-03	9.8	0.55		
留6采6	2020-10-10	37.6	13.45	5.5	5.5
	2020-11-15	15.3	10.86		
	2020-12-26	13.2	8.37		
	2021-03-03	11.7	5.75		

表2　土壤基本理化性质

Tab. 2　Soil basic physical and chemical properties

残茬类型	含水量/%	容重/g·cm^{-3}	有机质/g·kg^{-1}	<50 μm颗粒/%
全采收	1.64±0.49	1.49±0.02	3.46±0.29	25.65±0.67
间作留茬	1.90±0.28	1.59±0.01	4.35±0.43	16.09±0.38
留4采6	1.72±0.48	1.56±0.02	3.89±0.30	23.63±1.18
留6采6	1.85±0.53	1.55±0.01	4.07±0.35	19.53±0.63

注:表中数值为平均值±标准差。

沙仪,具体布设位置及集沙仪编号见图2a~d。为能够收集足够称量的沙,根据风力大小,风向是否能长时间稳定及地表起沙起尘强度确定集沙时长,风速以该段时间内200 cm高度的平均风速进行记录,监测日期、主风向及平均风速见表3。所采集的样品采用万分之一精度电子秤进行称量,并计算不同高度的输沙通量和总集沙通量,计算公式如下[24]:

$$Q_k = \frac{W}{S \times \Delta T} \tag{1}$$

$$Q_{总} = \sum_{k=0}^{n} Q_k \tag{2}$$

式中:Q_k为第k个梯度输沙通量(g·cm^{-2}·h^{-1});$Q_{总}$为总输沙通量(g·cm^{-2}·h^{-1});W为集沙量(g);S为通道口横截面积(cm^{-2});ΔT为集沙时间(h)。

2.3　近地表风场特征

在不同残茬类型的地块采用手持风速仪(Smart AS8336)测定风速廓线,测量高度分为6层,即5 cm、25 cm、50 cm、100 cm、150 cm和200 cm。在全采收地块中,为满足边界层充分发育所需条件,需要保证风速仪所处位置周围50 m以内没有作物[25]。风速测定频率为1/60 Hz,选取某5 min内200 cm高度的平均风速达到5 m·s^{-1}时的风速梯度绘制风速廓线。3种不同残茬类型的风速测定位置距离集沙仪2 m,集沙仪与风速测定位置连线与油莎豆种植

表3　不同监测时段的平均风速和风向

Tab. 3　Average wind speed and direction in different monitoring periods

日期(年-月-日)	平均风速/m·s^{-1}	主风向	集沙时长/h
2020-11-15	9.78	西偏北42°	23
2020-12-26	9.11	西偏北47°	23
2021-03-03	10.73	西偏北44°	22
2021-03-04	9.97	西偏北48°	21

方向平行，位置标记字母数字同集沙仪记号。

为深刻了解地表对风沙活动的影响，基于风速廓线对地表空气动力学粗糙度和摩阻速度进行计算，粗糙度和摩阻速度越大表明地表削减风速作用越强，其计算公式如下（公式3为风速与高度对数的回归模拟方程）[26]：

$$u_z = a + b\ln z \quad (3)$$

$$z_0 = e^{-\frac{a}{b}} \quad (4)$$

$$u^* = kb \quad (5)$$

式中：u_z为高度为z处的风速（m·s⁻¹）；a、b为回归系数；k为冯·卡曼常数，取0.4；z_0为空气动力学粗糙度（cm）；u^*为摩阻速度（m·s⁻¹）。

3 结果与分析

3.1 不同残茬类型总输沙通量差异

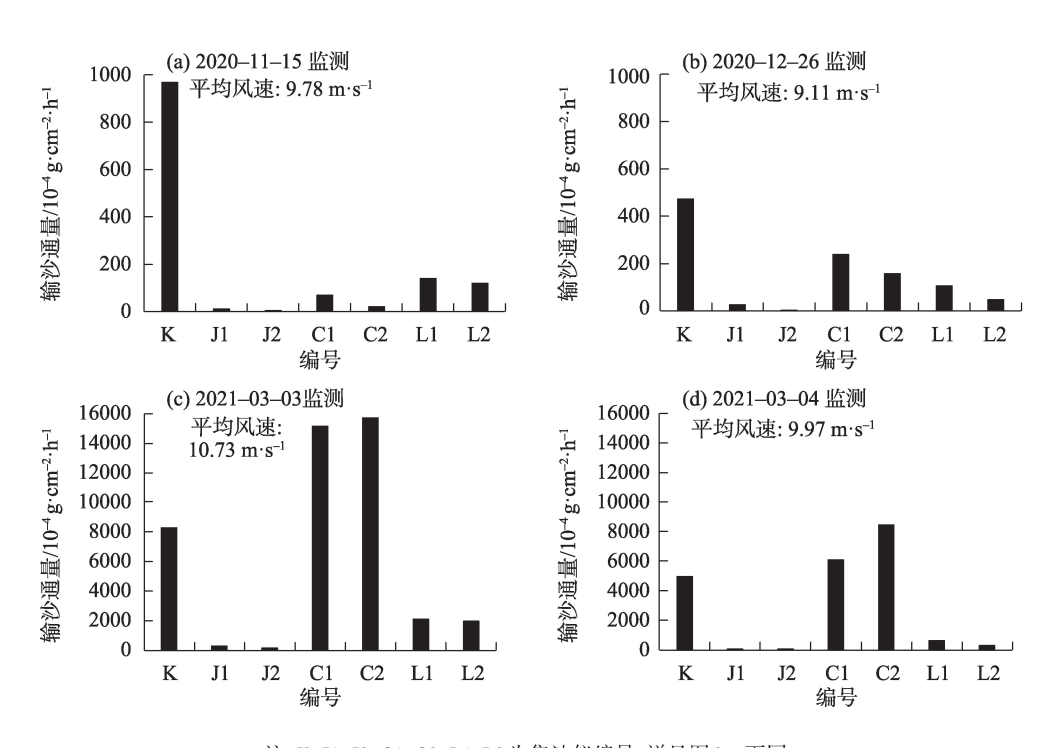
4次不同时段的监测中，间作未采收总输沙通量均为最小，且显著小于留4采6和留6采6的输沙通量（$P<0.05$）。留4采6总输沙通量在第1次监测中小于留6采6（图3a），而后3次监测的总输沙通量均大于间作未采收和留6采6，甚至后2次监测超过全采收（图3b~d）。留6采6除了第1次监测总输沙通量大于间作未采收和留4采6外，其他3次数值均在两者之间（图3）。

间作未采收和留6采6在4次监测中第1集沙仪的总输沙通量总是大于第2集沙仪的总输沙通量，表明在这2种模式下多带残茬能够较好的阻挡外来风沙。留4采6的总输沙通量仅在前2次监测表现为该趋势（图3a~b），后2次的监测数据表明留4采6已丧失防风固沙能力（图3c~d）。总体来看，间作未采收的残茬类型较其他2种残茬类型表现出更好的阻沙能力。

3.2 不同残茬类型风沙流结构差异

不同残茬类型的风沙流特征如图4所示。全采收沙尘输移高度集中在12~15 cm以下，间作未采收的集中在6 cm以下，留4采6在前2次监测中沙尘输移高度主要集中在12 cm以下（图4a~b），而后2次监测中12 cm以下的输沙通量近似甚至远超全采收相同高度下的输沙通量（图4c~d），留6采6模式输沙通量则基本集中在9 cm以下。结果表明间作未采收沙尘输移高度最低，较于其他模式有更好的固沙效果，留6采6沙尘输移高度较间作未采收高但是较留4采6低，而留4采6的沙尘输移高度最高。

从不同输沙高度的输沙通量来看，在4次监测中，间作未采收中J2集沙仪各高度的输沙通量均小于J1集沙仪，留6采6中L2集沙仪各高度的输沙通



注：K、J1、J2、C1、C2、L1、L2为集沙仪编号，详见图2。下同。

图3 不同留茬模式下总输沙通量

Fig. 3 Total sand flux under different stubble retention modes

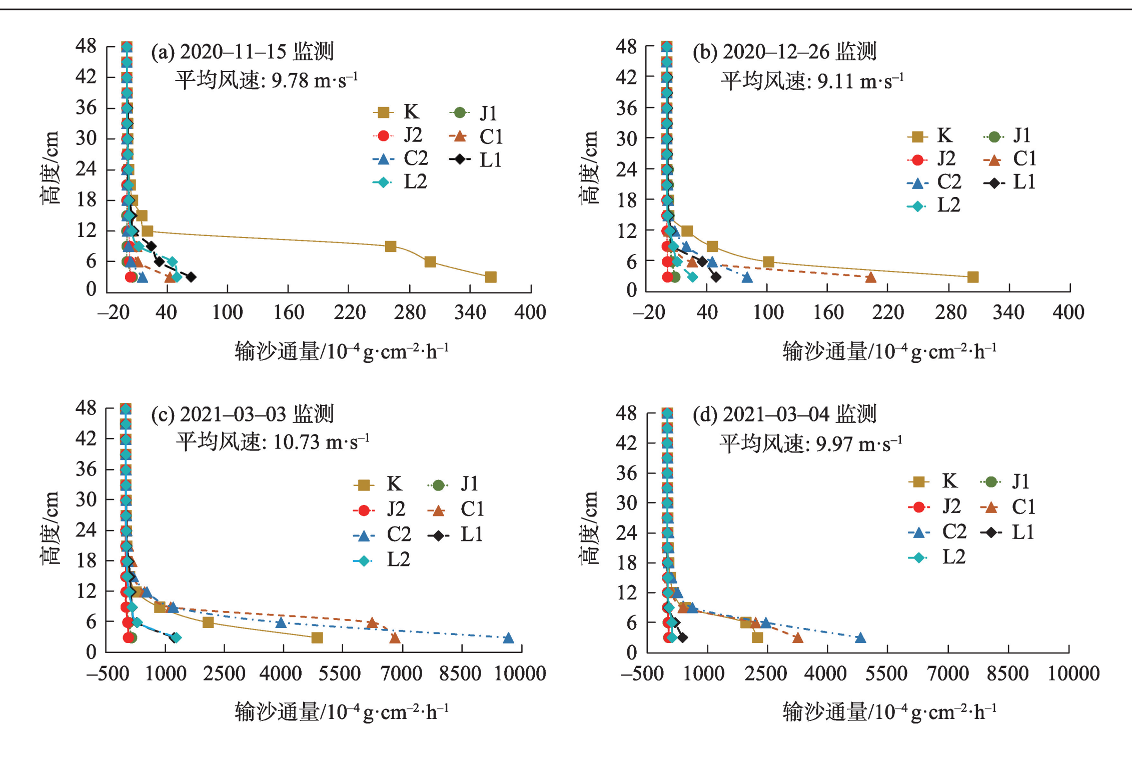


图4　不同残茬类型下风沙流特征

Fig. 4　Characteristics of wind-sand flow under different residue types modes

量则小于或接近于L1集沙仪。留4采6中仅在前2次监测表现出C2集沙仪各高度的输沙通量小于或接近于C1集沙仪(图4a~b)，后2次监测甚至表现出C2集沙仪大于C1集沙仪的结果(图4c~d)。

从输沙通量与高度最优拟合的结果可以发现(表4)，间作未采收J1集沙仪中输沙通量与高度拟合关系均呈指数函数，J2集沙仪中输沙通量与高度拟合关系均呈幂函数。其他残茬类型中各个位置的输沙通量与高度的拟合关系随时间推移表现出不规律的变化。通常若沙粒运动集中于地面表层，输沙通量随高度变化更趋向于幂函数，随着跃移沙粒含量的增加，输沙通量随高度变化逐渐趋向于指函数[27-29]。结果表明间作未采收相较于其他残茬类型能够在休耕期持续减少跃移沙粒的数量。

3.3　近地表风场特征

为更深入了解不同模式经历长久的风沙蚀积过程后是否还具备削弱风速能力，于2021年3月4日，对不同残茬类型不同高度的风速进行测定，绘制风速廓线并计算空气动力学粗糙度和摩阻速度。从风速廓线(图5)可知，风速随高度增加而增加，风速与高度的对数呈线性相关($P<0.05$)。空气动力学粗糙度和摩阻速度结果(表5)均表现为间作未采收最大，留6采6模式次之，留4采6和全采收模式最小。其中全采收模式和留4采6的粗糙度几乎为0。间作未采收和留6采6中J2和L2集沙仪处的粗糙度和摩阻速度分别大于J1和L1集沙仪的，表明在观测距离内，这2种模式中多条防护带能够对风能进行持续削弱。

4　讨　论

4.1　作物残茬的防风作用

通过作物残茬来对近地表风速进行削弱是保护性耕作的主要目的之一。气流在通过障碍物时，可以分为遇阻抬升区、集流加速区、减速沉降区和消散恢复区4个功能分区[30]，增加减速沉降区和减少消散恢复区是削弱近地表风速的关键。间作未采收中的油莎豆和梭梭的残茬形成高低穿插的防护体系，相较于其他残茬类型，可以较好的防止消散恢复区的扩大，并且存在更长更高的减速沉降区。其空气动力学粗糙度远大于其他2种残茬类型，且其J2集沙仪处的空气动力学粗糙度是J1集沙仪处的2倍，说明直立植物对风速的逐层削减具有重要的作用，这在之前的研究中已被多次证明[31-32]。

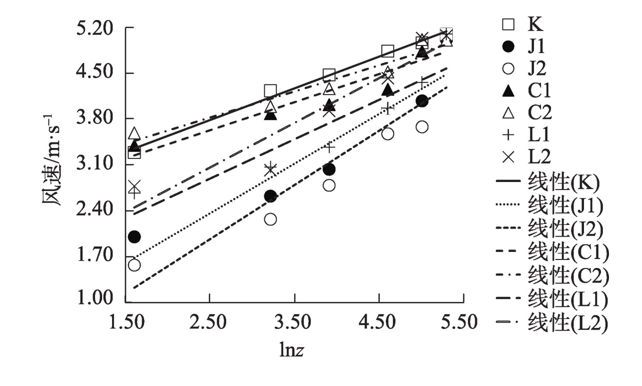
留4采6和留6采6可能并不能使减速沉降区完全覆盖住带间裸露地。前人的研究表明，风的剪

表4 不同残茬类型输沙通量(Q)与高度(H)拟合关系式

Tab. 4 Optimal fitting relations between sand flux and height under different residue types

日期(年-月-日)	平均风速/m·s^{-1}	残茬类型	编号	关系式	R^2
2020-11-15	9.78	全采收	K	Q=1611.60e$^{-0.29H}$	0.93
		间作未采收	J1	Q=0.10e$^{-0.23H}$	0.85
			J2	Q=17.37$H^{-2.87}$	0.75
		留4采6	C1	Q=52.21e$^{-0.28H}$	0.87
			C2	Q=7992.80$H^{-4.32}$	0.89
		留6采6	L1	Q=150.84e$^{-0.20H}$	0.83
			L2	Q=211.71e$^{-0.26H}$	0.91
2020-12-26	9.11	全采收	K	Q=32382.00$H^{-3.55}$	0.89
		间作未采收	J1	Q=-10.30e$^{-0.11H}$	0.95
			J2	Q=1.95$H^{-0.87}$	0.82
		留4采6	C1	Q=3905.90$H^{-2.92}$	0.97
			C2	Q=5926.30$H^{-2.98}$	0.93
		留6采6	L1	Q=489.340$H^{-1.90}$	0.87
			L2	Q=558.92$H^{-2.42}$	0.90
2021-03-03	10.73	全采收	K	Q=7892.10e$^{-0.24H}$	0.84
		间作未采收	J1	Q=618.15e$^{-0.28H}$	0.84
			J2	Q=584553.00$H^{-0.54}$	0.78
		留4采6	C1	Q=28277.00e$^{-0.28H}$	0.80
			C2	Q=13257.00e$^{-0.24H}$	0.84
		留6采6	L1	Q=4953.20e$^{-0.25H}$	0.80
			L2	Q=22121.00$H^{-2.35}$	0.99
2021-03-04	9.97	全采收	K	Q=175694.00$H^{-2.96}$	0.97
		间作未采收	J1	Q=113.91e$^{-0.29H}$	0.82
			J2	Q=79159.00$H^{-5.07}$	0.80
		留4采6	C1	Q=197058.00$H^{-3.03}$	0.97
			C2	Q=114033.00$H^{-2.53}$	0.97
		留6采6	L1	Q=1048.30e$^{-0.28H}$	0.83
			L2	Q=636.04e$^{-0.33H}$	0.84

注:Q为输沙通量(10^{-4} g·cm^{-2}·h^{-1});H为高度(cm);R^2为拟合优度。K、J1、J2、C1、C2、L1、L2为集沙仪编号,详见图2。下同。



注:z为手持风速仪测定高度。

图5 2021年3月4日不同残茬类型风速廓线

Fig. 5 Wind velocity profile under different residue types on March 4, 2021

应力恢复距离为粗糙元高度的4.8~10.0倍[33],所以即使在油莎豆残茬高度最高的时候,风的剪应力也会在2种残茬类型带间地的某处恢复。一旦超过颗粒起动的临界风速,新一轮的风沙流形成,再次遭遇下一条残茬带时便会发生沉积。随着沉积沙粒的累积,残茬带中开始产生沙埋,进而降低残茬的高度和盖度,这也是留4采6较早损失防风能力的重要原因,其空气动力学粗糙度已基本为0[34]。前人的研究结果也同样表明了高度和盖度低的残茬削风效果相对较差[23,33]。因此,单一的宽条带式油莎豆残茬削减风速的作用不如高低穿插搭配的作物残茬。

表5 2021年3月4日不同残茬类型空气动力学粗糙度及摩阻速度

Tab. 5 Aerodynamic roughness and friction velocity under different residue types on March 4, 2021

参数	K	J1	J2	C1	C2	L1	L2
空气动力学粗糙度/cm	0.005	0.553	1.156	0.003	0.001	0.100	0.137
摩阻速度/m·s^{-1}	0.192	0.304	0.332	0.172	0.160	0.240	0.272

4.2 作物残茬结构对风蚀的影响

从总输沙通量和风沙流特征来看，随着时间的推移，具有更宽残茬带的留6采6较于留4采6表现出更好的固沙作用，这与蔡福等[35]对带宽与风蚀量关系的研究结果表现一致。但是仅仅只考虑残茬的宽度是不够的，土壤风蚀的过程是风蚀和风积的机械叠加，能否使残茬在漫长的休耕期保持足够的高度和盖度也是至关重要的[36]。间作未采收中，作为直立植物的梭梭和草本植物的油莎豆高低搭配，加之带间距相对更窄，具有良好的屏蔽功能，不仅能沉降外来风沙，同时也能够抑制带间起沙。间作未采收的固沙优势从总输沙通量和各高度的输沙通量小于其他2种残茬类型的可以看出，有研究也表明了合适的带间距和残茬高度对风蚀具有重要的抑制作用[37-38]。同时，不可忽视的一点是，在梭梭林带下出现了以沙蓬为优势种的自然植被群落，调查发现某些梭梭带下自然植被的覆盖度甚至能达到5%以上，这对于抑制带间地的沙粒起动有非常大的帮助。这种带间地出现自然植被的现象也在之前的研究中出现，其发现合适的带间距能够帮助自然植被定居，加强区防风固沙效果[39-40]。所以，选择合适的采收间距及搭配合适的直立植物进行间作，会有益于在油莎豆采收后漫长的休耕期更好地减轻农田风蚀。

5 结 论

（1）在油莎豆耕作区休耕期中，间作未采收模式防风固沙效能最为突出，其更强地削弱了近地表风速，具有更稳定持久的固沙作用。油莎豆种植可以考虑选择合适的采收间距及搭配合适的直立植物进行间作，以在油莎豆采收后漫长的休耕期通过留茬来减轻风蚀，保护农田。

（2）留6采6虽然具有削风的能力，并能够减少一定的输沙通量，但是防风固沙作用不如间作未采收。留4采6则会过早的损失防风固沙能力，不足以达到控制整个休耕期农田风蚀的目的。总体而言，单一的宽条带式油莎豆残茬削减风速的作用不如高低穿插搭配的作物残茬。

（3）残茬保留时间长，防风固沙效果稳定，结构搭配合适的残茬类型是减轻土壤风蚀的关键措施之一，这对于干旱区农田的可持续发展有重要作用。

参考文献(References)

[1] 罗万银, 董治宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4): 75–83. [Luo Wanyin, Dong Zhibao. The progress and prospects of research on wind erosion induced soil nutrient and carbon cycling[J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 75–83.]

[2] Lü X, Li X, Wang H, et al. Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111488, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111488.

[3] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010: 119. [Ding Guodong. Aeolian physics[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 119.]

[4] Fryrear D W. Soil cover and wind erosion[J]. Transactions of the ASAE- American Society of Agricultural Engineers (USA), 1985, 28(3): 781–784.

[5] Pierre C, Kergoat L, Hiernaux P, et al. Impact of agropastoral management on wind erosion in Sahelian croplands[J]. Land Degradation & Development. 2017, 29(3): 800–811.

[6] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 免耕对农牧交错带农田休闲期土壤风蚀及其相关土壤理化性状的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3778–3784. [Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effects of no-tillage on soil properties affecting wind erosion during fallow in ectone of north China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3778–3784.]

[7] Gao Y, Dang X H, Yu Y, et al. Effects of tillage methods on soil carbon and wind erosion[J]. Land Degradation & Development, 2015, 27(3): 583–591.

[8] 杨彩红, 冯福学, 柴强, 等. 小麦玉米田耕作模式的防风蚀效果[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 9–15. [Yang Caihong, Feng Fuxue, Chai Qiang, et al. Soil wind erosion in wheat/maize intercropping with zero tillage and straw retention[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 9–15.]

[9] Pi H, Webb N P, Huggins D R, et al. Critical standing crop resi-

due amounts for wind erosion control in the inland Pacific Northwest, USA[J]. Catena, 2020, 195: 104742, doi: 10.1016/j.catena.2020.104742.

[10] 康玲, 孙鑫, 侯婷, 等. 内蒙古地区沙尘暴的分布特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 400-406. [Kang Ling, Sun Xin, Hou Ting, et al. Distribution characteristics of sandstorms in Inner Mongolian area [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 400-406.]

[11] 两次考察内蒙古, 习近平都有这项安排[J]. 实践(党的教育版), 2019(7): 17-18. [Xi Jinping had this arrangement during two investigations to Inner Mongolia[J]. Shijian (CPC Education Edition), 2019(7): 17-18.]

[12] 刘琳, 张文敬, 郝林凤, 等. 内蒙古巴彦淖尔市主要农作物秸秆利用现状及对策[J]. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(2): 44-46. [Liu Lin, Zhang Wenjing, Hao Linfeng, et al. Utilization status and countermeasures of main crops straw in Bayannur of Inner Mongolia[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2019, 40(2): 44-46.]

[13] 侯琼, 郭瑞清, 杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 560-564. [Hou Qiong, Guo Ruiqing, Yang Litao. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 560-564.]

[14] 王秀荣, 王琼, 卢燕宇, 等. 基于气候背景的作物种植条件综合评价概念模型及其应用——以内蒙古巴彦淖尔河套灌区为例[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(11): 1649-1660. [Wang Xiurong, Wang Qiong, Lu Yanyu, et al. Conceptual model based on climate for comprehensive evaluation of crop planting conditions: A case study in Bayannur Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1649-1660.]

[15] 刘玉兰, 王小宁, 舒垚, 等. 不同产地油莎豆性状及组成分析研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(8): 125-129. [Liu Yulan, Wang Xiaoning, Shu Yao, et al. Character and composition of *Cyperus esculentus* from different origins[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(8): 125-129.]

[16] 杨帆, 朱文学. 油莎豆研究现状及展望[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 4-6. [Yang Fan, Zhu Wenxue. Research status and prospect of *Cyperus esculentus*[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(7): 4-6.]

[17] 路战远, 刘和, 张建中, 等. 油莎豆产业发展现状、问题与建议[J]. 现代农业, 2019(6): 11, 13. [Lu Zhanyuan, Liu He, Zhang Jianzhong, et al. Development status, problems and suggestions of *Cyperus esculentus* industry[J]. Modern Agriculture. 2019(6): 11, 13.]

[18] 内蒙古自治区党委、自治区人民政府印发《关于加快推进"科技兴蒙"行动 支持科技创新若干政策措施》[N]. 内蒙古日报(汉), 2020-10-19(7). [The CPC Neimenggu Committee, People's Government of Inner Mongolia Autonomous. Accelerating the action of "revitalizing Inner Mongolia through science and technology" and several policies and measures to support scientific and technological innovation[N]. Inner Mongolia Daily (Chinese Version), 2020-10-19(7).]

[19] 赵小庆, 刘和, 路战远, 等. 北方风沙区油莎豆防风固沙技术模式[J]. 现代农业, 2019(7): 13-14. [Zhao Xiaoqing, Liu He, Lu Zhanyuan, et al. Technical model of windbreak and sand fixation of *Cyperus esculentus* planting in soil wind erosion area of northern China[J]. Modern Agriculture, 2019(7): 13-14.]

[20] 陈晨, 红梅, 张月鲜, 等. 有机物料添加对内蒙古河套灌区碱化土壤可溶性有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 331-336. [Chen Chen, Hong Mei, Zhang Yuexian, et al. Effects of organic material addition on dissolved organic carbon in alkali soil in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 331-336.]

[21] 厉静文, 郭浩, 吕永军, 等. 磴口县引种胡杨的生长规律及其评价[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 97-104, 136. [Li Jingwen, Guo Hao, Lü Yongjun, et al. Growth regularity and evaluation of *Populus euphratica* introduced in Dengkou County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 97-104, 136.]

[22] 舒扬, 刘兆刚, 杨素芝. 内蒙古磴口县沙化地区主要草本植物空间分布格局及抽样技术[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(9): 42-47. [Shu Yang, Liu Zhaogang, Yang Suzhi. Spatial distribution pattern and sampling technique for main herbaceous plants in desert land of Inner Mongolia[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(9): 42-47.]

[23] 刘目兴, 刘连友. 农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 295-300. [Liu Muxing, Liu Lianyou. Effect of crop stubble on wind field above field surface during fallow period of cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 295-300.]

[24] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 58-67. [Yang Zhuanling, Qian Guangqiang, Dong Zhibao, et al. Aeolian sediment transport in the Sanlongsha Area to the north of Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 58-67.]

[25] Counihan J. Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements[J]. Atmospheric Environment, 1971, 5(4): 637-642.

[26] 魏宝, 丁国栋, 吴斌, 等. 不同盖度沙蒿群丛防风作用研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 213-217. [Wei Bao, Ding Guodong, Wu Bin, et al. Study on windbreak effect of *Artemisia ordosica* community over different vegetation coverage[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2): 213-217.]

[27] 李后强, 艾南山. 风沙湍流的间隙性、稳定性分布及分形特征[J]. 中国沙漠, 1993, 13(1): 14-23. [Li Houqiang, Ai Nanshan. The intermitteny, stable distribution and fractal characteristic for the wind-sand turbucent flow[J]. Journal of Desert Research, 1993, 13(1): 14-23.]

[28] 李振山, 张琦峰. 风沙流的输沙率沿程变化规律[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 189-193. [Li Zhenshan, Zhang Qifeng. Evolution of streamwise sand transport with distance[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 189-193.]

[29] 董玉祥, 马骏. 风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 179–183. [Dong Yuxiang, Ma Jun. Field measurements of influence of total sand transport rate on the structure of wind-sand flow on the coastal transverse ridge[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(9): 179–183.]

[30] 康文岩, 王立, 屈建军, 等. 包兰铁路沙坡头段不同编制结构的枝条阻沙栅栏防护效应风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 94–99. [Kang Wenyan, Wang Li, Qu Jianjun, et al. Wind tunnel simulation experiment on the protective effect of different structures of sand-blocking fence in Shapotou section of Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 94–99.]

[31] 董慧龙, 杨文斌, 王林和, 等. 单一行带式乔木固沙林内风速流场和防风效果风洞实验[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 110–116. [Dong Huilong, Yang Wenbin, Wang Linhe, et al. Windbreak effects and wind velocity flow field of one-line-shelter belt [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23 (7): 110–116.]

[32] 杨文斌, 王晶莹, 董慧龙, 等. 两行一带式乔木固沙林带风速流场和防风效果风洞试验[J]. 林业科学, 2011, 47(2): 95–102. [Yang Wenbin, Wang Jingying, Dong Huilong, et al. Windbreak effects and wind velocity flow field of low density forest with two-line-one-belt distribution patterns of single-belt scheme[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(2): 95–102.]

[33] Bradley E F, Mulhearn P J. Development of velocity and shear stress distribution in the wake of a porous shelter fence[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 15: 145–156.

[34] Pi H, Huggins D R, Sharratt B. Threshold friction velocities influenced by standing crop residue in the inland Pacific Northwest, USA[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(16): 2356–2368.

[35] 蔡福, 周广胜, 明惠青, 等. 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5339–5352. [Cai Fu, Zhou Guangsheng, Ming Huiqing, et al. Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5339–5352.]

[36] 赵沛义, 妥德宝, 康暄, 等. 阴山北麓残茬间作带田土壤风蚀规律[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 55–58. [Zhao Peiyi, Tuo Debao, Kang Xuan, et al. Wind erosion law in strip intercropping field in north Yin-shan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 55–58.]

[37] 胡广录, 王德金, 廖亚鑫, 等. 黑河中游荒漠—绿洲过渡带斑块植被区风沙蚀积强度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1547–1554. [Hu Guanglu, Wang Dejin, Liao Yaxin, et al. Intensity of wind erosion and deposition in patch vegetation area of desert-oasis ecotone in the middle reaches of the Heihe River of China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1547–1554.]

[38] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 带田残茬带宽度及高度对土壤风蚀模数影响的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 206–210. [Zhao Peiyi, Tuo Debao, Li Huanchun, et al. Wind tunnel test on effect of strip width and crop stubble height on wind erosion modulus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(11): 206–210.]

[39] 闫敏, 左合君, 杨阳, 等. 不同带间距柠条锦鸡儿防护林防风效应与带间植被组成[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 139–145. [Yan Min, Zuo Hejun, Yang Yang, et al. Different distance *Caragana korshinskii* protection forest for wind reducing effect and inter-type vegetation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 139–145.]

[40] 杨文斌, 郭建英, 胡小龙, 等. 低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32 (5): 1291–1295. [Yang Wenbin, Guo Jianying, Hu Xiaolong, et al. Vegetation restoration process and sand-reversal effect of low coverage sand-fixing forest belts[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1291–1295.]

Effects of crop residues on farmland wind erosion in *Cyperus esculentus* planting area

TAN Jin[1,2], WU Xiuqin[1,2], RUAN Yongjian[1,2], ZHANG Huan[1,2],
FENG Mengxin[1,2], SHA Rina[1,2]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Beijing 100083, China;
2. Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, Yanchi 751500, Ningxia, China)

Abstract: In the context of global climate change and rapid economic development, agricultural planting structures must explore new methods of adapting to complex climate change. Traditional crops grown in Inner Mongolia, China are unable to meet the demand for scientific and ecologically friendly planting structures. *Cyperus esculentus* is drought resistant, barren resistant, saline-alkali resistant, and rich in oil, making it ideal for adjusting the agricultural planting structure in Inner Mongolia. Harvesting *Cyperus esculentus*, on the other hand, will disturb the land, and the risk of wind erosion is unknown. The goal of this study was to determine the impact of different crop residue types on farmland wind erosion in the *Cyperus esculentus* planting area as well as to provide a scientific foundation for wind erosion control in the *Cyperus esculentus* planting area. All crop residues were retained by intercropping 1 *Haloxylon ammodendron* row with 1 *Cyperus esculentus* ridge, "Retain 4 ridges and harvest 6 ridges", or "Retain 6 ridges and harvest 6 ridges". Additionally, the "all harvest" area was used as the control area. In each mode, two sand collectors with 16 channels were used. The sand collector was assembled 1.5 m behind the first belt and the seventh belt in "All retain" by intercropping, and arranged 4.5 m behind the first and second belts in the "Retain 4 ridges and harvest 6 ridges" and "Retain 6 ridges and harvest 6 ridges". Simultaneously, a sand collector was installed in the "All harvest" area as the control. Wind speed was measured at various heights to better understand the characteristics of the nearsurface wind field of different stubble retention modes. The wind speed measurement sites were 2 m away from the sand collectors, and the height of wind speed measurement was divided into 5 cm, 25 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm, and 200 cm to draw wind profile and calculate aerodynamic roughness(z_0) and friction velocity(u*). The results showed that the sand flux at different heights in "All retain" by intercropping was the lowest of the three crop residue types, while z_0 (0.553 cm and 1.156 cm) and u* (0.304 and 0.332) were the highest. The sand flux of the "Retain 4 ridges and harvest 6 ridges" increased over time, even surpassing that of the "All harvest", and z_0 was nearly 0 cm and u* was the lowest. The sand flux of "Retain 6 ridges and harvest 6 ridges" were less than "Retain 4 ridges and harvest 6 ridges", but greater than that of "All retain" in intercropping, and z_0 was 0.100 cm and 0.137 cm, u* was 0.240 and 0.272, respectively. Generally, the effect of single wide strip *Cyperus esculentus* residue on reducing wind speed was not as good as the crop residue which was interspersed with high and low. It can be considered to select appropriate harvesting spacing and intercropping appropriate upright plants to retain residue in the long fallow period after harvesting to reduce wind erosion and protect farmland soil. This study concluded that retaining crop residue during the fallow period is one of the most important measures for reducing soil wind erosion, which has significant ecological value for the sustainable development of farmland in arid areas.

Key words: *Cyperus esculentus*; crop residues; sand flux; wind-sand flow; aerodynamic roughness; friction velocity